

« Archéologie : Imagerie numérique et 3D »

Séminaire scientifique et technique organisé par l'Inrap et Inria/IRISA
26-27 juin 2018, Rennes

La modélisation 3D et l'imagerie numérique sont désormais d'utilisation courante en archéologie, notamment comme outil d'aide au relevé, à l'étude et à la diffusion des résultats. Les outils et logiciels inhérents à ces technologies numériques ont donné lieu à de nombreux retours d'expériences, d'études ou de comparaisons. Aujourd'hui, les protocoles s'uniformisent peu à peu, et les esprits sont plus disponibles pour analyser leurs apports dans le processus de fabrication de la connaissance.

Les communications du séminaire se concentreront donc en priorité sur les apports heuristiques de la modélisation 3D et de l'imagerie numérique. Il s'agira de montrer comment ces technologies s'insèrent dans les processus d'enregistrement de terrain, quels changements méthodologiques peuvent être observés, et comment les résultats et les produits qu'elles proposent sont utilisés. L'évolution des questionnements scientifiques pourra être également abordée, ainsi que les changements dans la nature et la forme de ce qui est enregistré, dans les manières de fouiller, d'observer, de raisonner, de traiter, d'analyser et de restituer les données et les interprétations.

Au regard de leurs expériences, dans des contextes chronologique et opérationnel variés (préventif, programmé, subaquatique), dans le cadre de l'étude de vestiges de toutes natures (bâti, funéraire, mobilier, grottes, gravures, etc.), et quelles que soient les techniques utilisées (photogrammétrie, lasergrammétrie, tomodynamométrie, etc.), les communicants s'attacheront, en s'appuyant sur une synthèse de leurs expériences, à présenter leurs réflexions sur l'intégration de ces technologies dans les processus d'enregistrement, d'étude et de diffusions des données.

Session 1- Impacts opérationnel et méthodologique

Retours d'expérience analysant comment les technologies numériques de captation et de représentation des vestiges influent sur la conduite de l'opération et les données enregistrées.

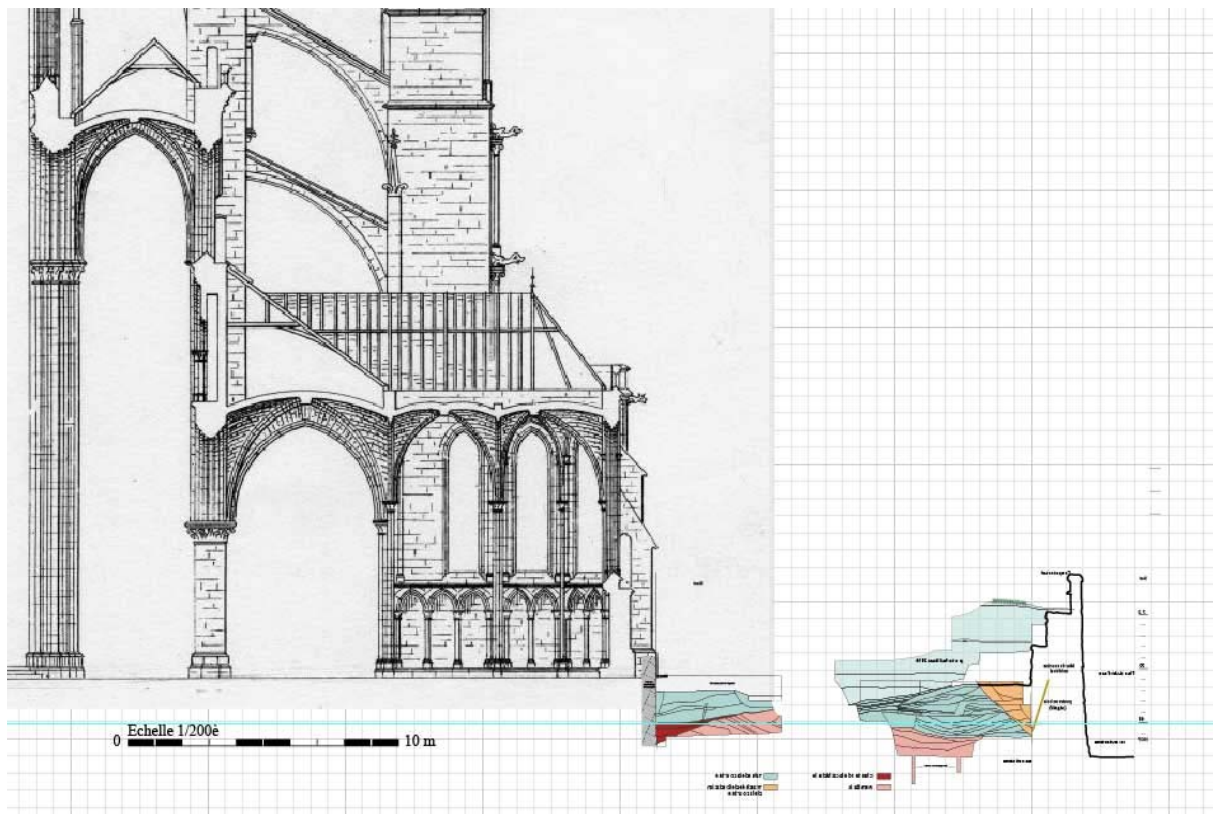
Un espace urbain singulier : les abords de la cathédrale du Mans. Enjeux et méthodes

Stéphane Augry, Inrap, UMR 6566 CReAAH

La fouille, encore en cours, des jardins de la cathédrale au Mans a commencé en septembre 2017. Elle s'inscrit dans le projet de la mairie d'aménager un large espace au pied du chevet gothique de la cathédrale Saint-Julien. Il s'agit d'un chantier complexe de par les volumes de terres déplacés mais surtout par la présence d'architectures monumentales, dont les murs des différents systèmes défensifs de la ville. Les enjeux scientifiques sont multiples et leur étude constitue une opportunité unique d'aborder le passé de la ville sur le temps long.

Cette présentation fait le bilan des multiples méthodes employées (photogrammétrie, lasergrammétrie, maquette numérique, anastylose...) pour non seulement garantir l'enregistrement stratigraphique dans « les règles de l'art », mais également appréhender au mieux les questions volumétriques et les « emboîtements » stratigraphiques singuliers en contexte fortement stratifié et monumental.

Le cœur de la présentation étudie le lien entre l'enregistrement classique et l'enregistrement numérique déployés par les fouilleurs tout au long de l'opération d'archéologie préventive.



Restitution du transept stratigraphique réalisé entre la cathédrale et l'enceinte médiévale. © S. Augry, Inrap.

L'imagerie 3D en archéologie : de l'enregistrement de terrain à l'aide aux relevés

Sébastien Gaime, Inrap, UMR 6042 GEOLAB

Avec : Guillaume Martin (Inrap), Daniel Parent (Inrap), Jean Pierre Van Staebel (Université Paris IV Sorbonne), Abdallah Fili (Université El Jadida, Maroc), Gregory Chaumet (Université Paris IV Sorbonne), Christophe Bascoul (IFMA - Université Clermont-Auvergne)

Depuis maintenant plusieurs années (2008), dans le cadre d'opérations d'archéologie à l'Inrap, nous avons mené des expériences sur l'utilisation de la 3D dans le cas d'opération d'archéologie préventive et programmée sur des terrains particulièrement difficile d'accès. Les différentes méthodes ont été utilisées pour l'étude de « carrières » de sarcophages mérovingiens en Auvergne, pour l'étude de minarets médiévaux au Maroc, et pour l'étude d'un four de poterie moderne partiellement en élévation.

Ces expériences ont porté dans trois directions différentes pour lesquelles l'imagerie 3D modifie l'approche de terrain :

- L'enregistrement des données archéologiques grâce à ces nouvelles technologies, par la production d'images en trois dimensions (imagerie numérique, scan 3D).
- L'aide à la production des documents graphiques habituels à la profession (relevés pierres à pierres, plan, coupe...).
- La production de nouvelles images insérées au rapport d'opération, aux articles scientifiques, aux présentations grand publiques...



Relevé au scan 3D du Minaret de Tît (Maroc). © G. Chaumet, Université Paris IV Sorbonne



Relevé photogrammétrique de la grotte du Sarcouy.

Vers la systématisation de l'enregistrement 3D en archéologie du bâti : usage et intégration de la photogrammétrie dans les opérations de bâti en Alsace.

Lucie Jeanneret, Archéologie Alsace

Le développement de l'usage de la photogrammétrie en archéologie amène progressivement à la systématisation de ce type d'enregistrement sur les opérations de diagnostics et de fouilles préventives. Progressivement adopté dans des contextes sédimentaires sur des emprises bien circonscrites, son usage en archéologie du bâti est plus difficile à systématiser : problème d'accessibilité, grandes surfaces, volumes complexes... sont autant de freins à la mise en place d'un protocole strict d'enregistrement 3D. L'évolution des modes d'acquisition et des interfaces logicielles permet toutefois d'envisager des traitements photogrammétriques plus rapides sur les opérations de bâti. Dans le cadre du développement d'opérations de bâti en Alsace sur des édifices complets (château, maison urbaines), le choix a été fait d'intégrer cet enregistrement 3D dans le cadre de fouilles préventives. Cette démarche a été élargie aux diagnostics dès 2017. Son intégration dans les opérations d'archéologie du bâti amène à repenser les méthodes d'enregistrement et de relevé en élévation. Outre un gain de temps, ces procédés permettent de lever un certain nombre de contraintes rencontrées en archéologie préventive (délais, accessibilité, sécurité) et de proposer une vision plus globale des édifices étudiés. Il s'agira donc de revenir sur les choix opérés en amont des interventions, sur les contraintes rencontrées et d'exposer les avantages et les inconvénients de cette démarche dans le cadre du traitement d'élévations. Il faut notamment poser la question du temps d'acquisition, de la qualité des traitements effectués mais aussi des problèmes de conservation et d'archivage de ces données. La présentation s'appuiera sur quelques opérations menées : l'étude du château de Breuschwickersheim (67), de la maison en pan de bois du Dinghof de Schiltigheim (67) et des diagnostics d'une maison urbaine à Boersch (67) et d'une tour bastionnée à Neuf-Brisach (68).

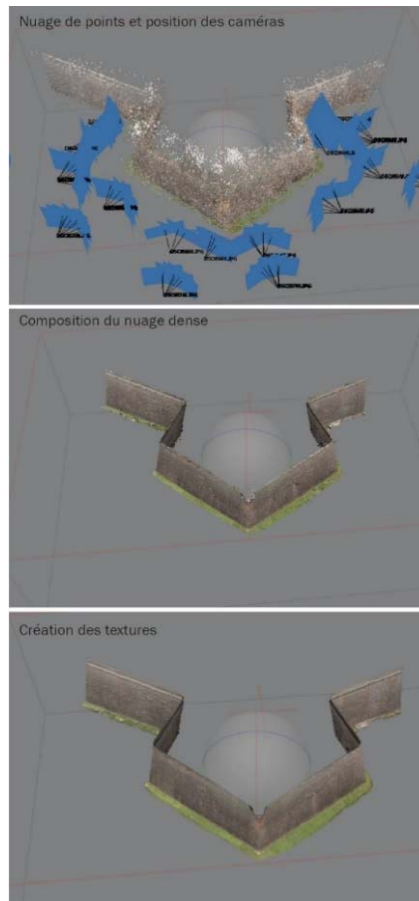


Illustration du traitement du relevé extérieur de la tour bastionnée n°2 de la fortification de Neuf-Brisach. © Relevé et traitement : L. Jeanneret, Archéologie Alsace

Les nouvelles techniques de relevés appliquées à l'archéologie du bâti et à l'archéologie urbaine *Elen Esnault, Inrap, UMR 6566 CReAAH*

L'intervention vise à montrer en quoi, au travers d'études récentes et variées (archéologie en milieu urbain, étude de bâti, contexte complexe), les technologies de relevé 3D peuvent être un outil pour l'archéologue à la fois sur le terrain mais également en post-fouille puis en communication/publication. Le recours à la photogrammétrie et/ou au scanner 3D est utile voire indispensable dans des cas précis pour lesquels il est nécessaire d'adapter la méthodologie aux objectifs à atteindre. Pour autant, ces nouvelles techniques ont également leurs limites qu'il est primordial de connaître pour mener à bien une opération archéologique.



Étude de bâti et photogrammétrie en cours dans le cloître du Mont-Saint-Michel. © E. Esnault, Inrap

Relevé d'art pariétal et 3D : l'occasion d'une remise en question des pratiques scientifiques
Geneviève Pinçon, Centre National de Préhistoire (CNP), UMR 5608 TRACES et Oscar Fuentes, Centre National de Préhistoire (CNP)

L'étude de l'art des grottes ornées s'appuie depuis plus d'un siècle sur un relevé analytique des parois qui participe à la perception de la pensée des sociétés préhistoriques. L'analyse des pratiques met en évidence deux cadres de référence parallèles qui tendent cependant aujourd'hui à converger. En effet, comme ce fut le cas en son temps pour la photographie, l'usage des ressources numériques 3D influe de façon significative sur les pratiques des chercheurs.

Une synthèse de l'analyse de ces pratiques exercées par les préhistoriens spécialistes des expressions graphiques paléolithiques réalisée récemment par le centre national de Préhistoire à l'échelle nationale sera présentée.

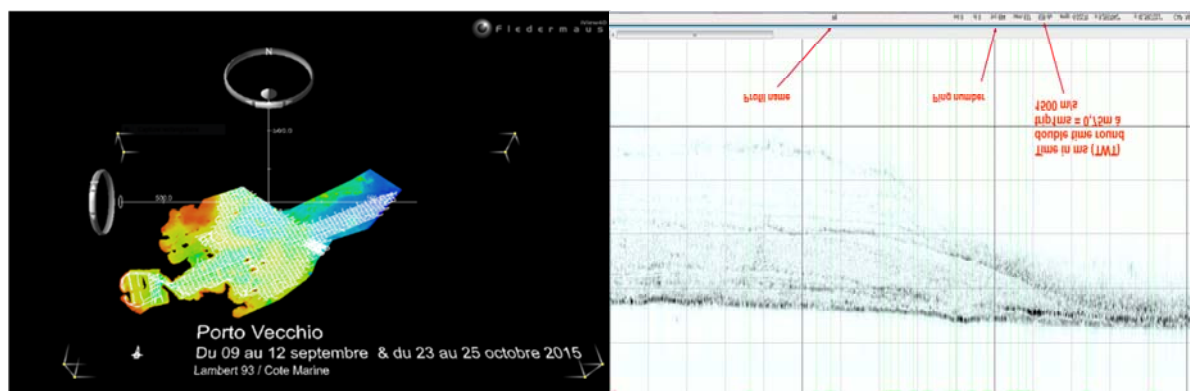
Session 2- Image numérique et modèle 3D : des outils au service de la fabrication de la connaissance

Impact épistémologique sur le raisonnement archéologique mis en évidence par des exemples d'utilisation de l'imagerie numérique 2D et 3D : comment pense-t-on devant ces images, quels raisonnements élabore-t-on, quelle est la méthode d'analyse du vestige qui se met en place ? Comment et pourquoi de nouvelles idées et de nouveaux questionnements voient-ils le jour ?

Images 2D et 3D pour appréhender les sites immergés : quelles techniques, quelles méthodes ?
Philippe Pelgas, Inrap, UMR 5060 IRAMAT

En 1943, l'arrivée du scaphandre autonome a permis d'atteindre des gisements archéologiques plus facilement qu'avec ce que l'on nommait « les pieds-lourds », soit fortuitement ou intentionnellement (récupération, randonnée, pillage), soit par des autorisations dans le cadre légal de l'archéologie subaquatique et sous-marine. Dès lors, la recherche systématique de sites archéologiques a eu recours à des méthodes non intrusives nécessitant de percer la colonne d'eau, dans le but, non seulement, de découvrir la nature des fonds, leur cartographie et les différents sédiments, mais aussi de percer ceux-ci pour y déceler les artefacts enfouis. Sans entrer dans une historiographie de la discipline, l'état des connaissances nous permet de discerner quatre grandes familles d'outils répondant à ces objectifs. Et si certaines des techniques mobilisées sont nées il y a une quarantaine d'années, elles ont considérablement évolué cette dernière décennie ; leur intégration aux processus de la recherche archéologique est donc assez récente.

Au fur et à mesure de la compréhension de la propriété de la matière, et en recourant à des chaînes de traitements informatiques avec leurs algorithmes propres, l'analyse des données brutes produites par ces techniques va conduire à la constitution d'images de synthèse répondant à des normes établies. Pour décrypter ces représentations abstraites d'un réel autrement invisible, l'œil humain a besoin d'un temps d'adaptation et d'apprentissage.



La tombe aristocratique gauloise de Warcq (Ardennes) : méthodes d'analyses des objets composites

Emilie Millet, Inrap, UMR 8546 AOrOc et Renaud Bernadet, restaurateur indépendant

La tombe aristocratique de Warcq (Ardennes), datée du milieu du II^e s. av. n. ère, constitue un ensemble exceptionnel et particulièrement atypique dans ce contexte chrono-culturel. Outre l'inhumation du défunt sur un char d'apparat à deux roues, orné de feuilles d'or, une véritable mise en scène funéraire apparaît également à travers la disposition de quatre chevaux. Placés dans l'axe du char, deux d'entre eux portaient encore des éléments de harnachement alors que leur garrot était surmonté d'un joug et d'anneaux passe-guides, donnant à l'ensemble un caractère spectaculaire. Le milieu humide de la tombe et les pièces métalliques en bronze et fer ont favorisé la préservation des matériaux organiques.

Le projet de la communication est de présenter le protocole méthodologique mis en place sur le terrain et en laboratoire à travers trois études de cas : le char, le joug et les chevaux harnachés. Le focus sera mis sur les diverses investigations menées au niveau de l'acquisition des données qui constituent les étapes nécessaires à l'analyse des objets : tomodensitométries, micro-fouille en laboratoire, nettoyage pour étude des objets, photogrammétries et scanner 3D. L'accent sera mis sur le rôle essentiel des différentes techniques d'imagerie numérique dans l'exploitation scientifique de la documentation comme sur leur vocation de sauvegarde pérenne.



L'exemple du joug et des anneaux passe-guides de Warcq (Ardennes).

Quelques étapes d'analyses : tomodensitométrie, nettoyage pour étude et photogrammétrie.

© D. Glücksman (haut gauche) ; R. Bernadet (haut droite et bas gauche) ; Défi Imag'In IRMA (bas droite)

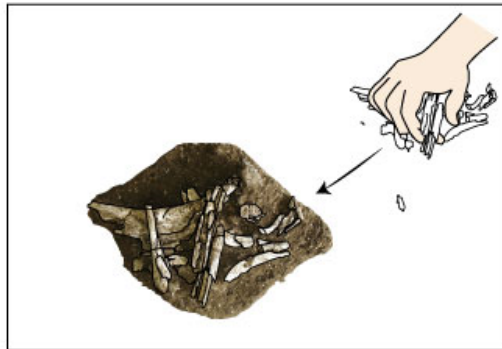
Nouvelles technologies numériques, nouveau regard porté sur les crémations

Isabelle Le Goff, Inrap, UMR 7206 Éco-Anthropologie et Ethnobiologie

Les technologies d'imagerie médicale sont régulièrement testées par les archéo-anthropologues en charge de fouiller des structures liées à la crémation. Cet intérêt découle probablement d'un changement de perception des dépôts cinéraires (urne, amas d'os ou de résidus de combustion ...), engagé dans les années 80, bien avant la démocratisation de l'imagerie médicale. Un autre regard s'est alors posé sur les dépôts cinéraires les percevant comme un « micro » site archéologique. Ce nouveau statut engendre des protocoles de fouille et d'enregistrement, notamment la mise en place d'un démontage raisonné de leur contenu par segmentation en une série de passes. Se dévoile finalement de quelle manière les composantes matérielles impliquées dans les funérailles sont mises en relation. Autrement dit, le dépôt cinéraire peut être regardé comme le résultat d'un processus complexe de transformation du cadavre en une entité physique et symbolique autour de laquelle se construisent les funérailles.

Le travail de décryptage de ce processus repose sur la capacité d'acquisition de données élémentaires au cours de la fouille et de l'étude (l'identification des composantes, leur caractérisation, la détection et l'enregistrement de plans de fouille significatifs en terme de gestes funéraires, la restitution de la forme externe du dépôt...). Les dépôts cinéraires, souvent prélevés avant d'être fouillés en différé, offrent des conditions propices à l'entrée de ces contextes archéologiques dans les centres d'imageries. Par un accès non destructif à leur structure interne, la motivation invoquée touche au gain de temps, à l'efficacité espérée grâce à la visualisation d'un contenu inaccessible ou encore à la prédictibilité du déroulé de la fouille. Toutefois et la plupart du temps, cette utilisation reste limitée à une simple visualisation et porte généralement sur des pièces exceptionnelles, ou à des opportunités de mises à disposition de ces technologies. Dans le cadre du projet ANR « Introspection du Mobilier Archéologique à l'ère du Numérique », nous avons testé les possibilités offertes par ces technologies d'imagerie médicale (en particulier la tomodensitométrie) et l'exploitation des données obtenues au travers de technologies issues des dernières recherches en 3D, telles que l'impression 3D ou la réalité virtuelle. À cette fin, plusieurs dépôts osseux issus du site antique de Matouges (Marne), des nécropoles de l'âge du Bronze de Cesson et de Bussy-St-Georges (Ile-de-France) ont fait l'objet d'une acquisition par rayons X. Il est prévu ensuite un traitement 3D et des développements en réalité virtuelle.

Cette intervention propose de restituer ces expériences d'acquisition et de traitements de données, en mettant l'accent à la fois sur les possibilités qu'offrent ces technologies d'élargir le regard posé sur les crémations, d'enrichir les protocoles existants grâce aux interactions avec les données numériques 3D, et d'optimiser la collaboration au sein des équipes de fouille en charge, notamment, d'ensembles funéraires importants.



Une poignée. © J.-J. Bigot, Inrap

Céramiques imprimées de Méditerranée occidentale : apports de la micro-tomographie à la restitution des traditions techniques *Louise Gomart, UMR 8215 Trajectoires*

Avec : Allon Weiner, Marzia Gabriele, Gilles Durrenmath, Sabine Sorin, Lucia Angeli, Marta Colombo, Cristina Fabbri, Roberto Maggi, Chiara Panelli, Didier F. Pisani, Giovanna Radi, Carlo Tozzi, Vanna Lisa Coli, Serge Cohen, Juliette Leblond, Laure Blanc Ferraud, Didier Binder

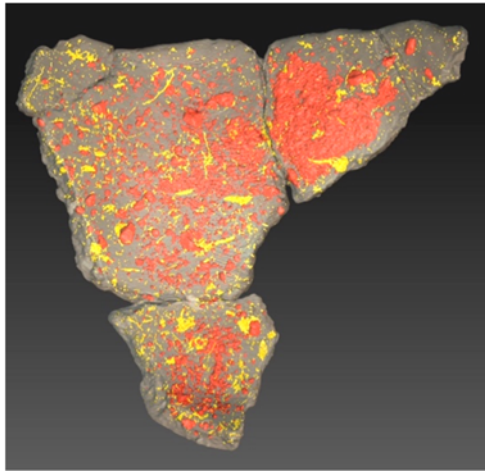
L'introduction des modes de vie agricoles en Méditerranée occidentale est caractérisée archéologiquement par le complexe Impresso-cardial, dont les gisements sont mis au jour de la Dalmatie à la Péninsule ibérique. L'étude d'assemblages céramiques associés à la phase d'expansion initiale de ce complexe (phase *Impressa*), menée dans le cadre de l'ANR CIMO¹, a permis de reconstruire les gestes techniques opérés par les agro-pasteurs lors de la production de leurs poteries et suggère l'existence de deux communautés de pratique en contexte *Impressa* :

1. l'une identifiée dans le centre-est de l'Italie dès 5900 av. N.È, qui met en œuvre des techniques déjà observées dans les premiers contextes agricoles balkaniques autour de 6100 av. N.È (poteries façonnées par superposition de rouleaux d'argile) ;

¹ *Céramiques imprimées de Méditerranée occidentale: recherches interdisciplinaires sur le Néolithique ancien. Recherche interdisciplinaire sur la poterie du Néolithique ancien (6ème millénaire av. N.-E.) : matières premières, productions, usages et transferts*, ANR-14-CE31-0009 portée par D. Binder (Université Côte d'Azur, CEPAM).

2. L'autre identifiée dans l'arc liguro-provençal dès 5800 av. N.È, qui emploie une technique qui n'avait jamais été identifiée auparavant (poteries façonnées par juxtaposition de « patches spiralés »).

L'absence de référentiel archéologique ou ethnographique pour cette dernière méthode de façonnage nous a conduit à mettre en place une approche multi-échelle, associant analyse macroscopique des céramiques et imagerie micro-tomographique (μ -CT) à différents niveaux de résolution (du scan médical au Synchrotron). Les premières analyses montrent le fort potentiel *de la micro-tomographie* pour appréhender les techniques de fabrication des céramiques *Impressa*. Ces analyses sont actuellement prolongées et enrichies dans le cadre du projet UCA^{JEDI} *Tomographie Multiscale : Imagerie et Modélisation des Matériaux, Traditions Techniques et Transferts*² associant analyses archéologiques, analyses des matériaux et mathématiques appliquées. Dans le cadre de cette communication, nous exposerons les modalités de mise en place de notre démarche multi-échelle au regard de nos problématiques archéologiques et présenterons les apports de l'imagerie 3D appliquée aux assemblages céramiques *Impressa* dans le cadre plus large des recherches sur les mécanismes de Néolithisation en Méditerranée occidentale.



Exemple de reconstitution 3D de la microstructure interne d'une céramique *Impressa* de Pendimoun par μ -CT (en gris : surface ; en jaune : pores, en rouge : inclusions minérales). © ANR CIMO, CNRS CEPAM

La photogrammétrie au service de l'étude d'un dolmen à couloir au Manémeur à Quiberon *Sandra Sicard, Inrap, UMR 6566 CReAAH*

L'utilisation de la modélisation 3D est encore peu développée dans le cadre de fouilles préventives en milieu rural, plus particulièrement pour les périodes anciennes. En effet, la structuration des sites préhistoriques se prête a priori assez mal à l'intégration de ces technologies dans les processus d'enregistrement ou d'études (pas d'élévation, une structuration lâche ou extensive des sites...).

Le site funéraire néolithique du Manémeur à Quiberon est un parfait contre-exemple de cet a priori puisque l'utilisation de la photogrammétrie nous a permis de procéder à la fouille exhaustive de ce monument en seulement trois mois tout en réalisant un enregistrement de terrain très complet et très précis. S'agissant d'une construction en pierres sèches conservée au mieux sur quatre ou cinq assises de blocs de granite, il était nécessaire d'enregistrer chaque bloc en position primaire avant démontage, mais également d'en « conserver » certains en 3D afin de pouvoir les étudier plus en détail après la fouille. En effet, nombre d'entre eux portaient des stigmates d'aménagement ou de régularisation mais ils représentaient un volume trop important pour être gardés. Seul l'enregistrement numérique mis en œuvre pendant la phase de terrain était à même de répondre à ces impératifs scientifiques soumis à des contraintes de temps et de logistique. Après la fouille, l'exploitation des données se révèle également facilitée par les outils informatiques associées à l'imagerie numérique avec, par exemple, la manipulation et le remontage virtuels (en contrepoint du remontage mental) des blocs.

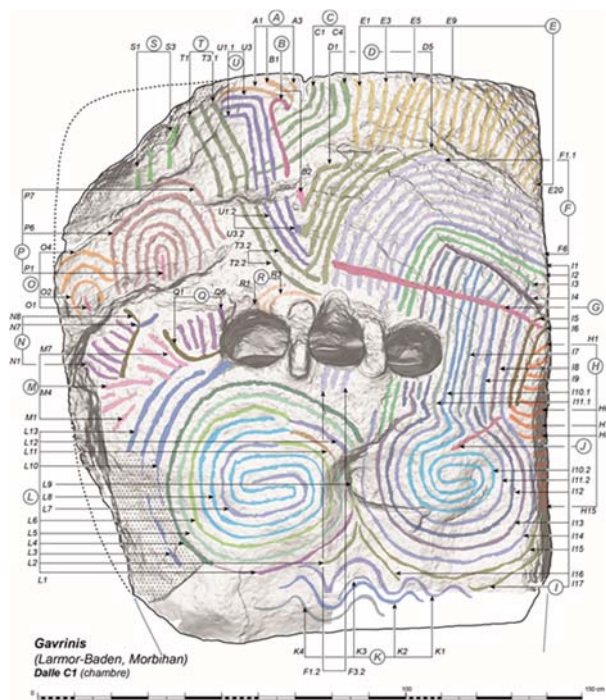
² *Tomographie Multiscale : Imagerie et Modélisation des Matériaux, Traditions Techniques et Transferts*, Programme UCA^{JEDI} porté par D. Binder (Université Côte d'Azur, CEPAM).

Aux dimensions de l'image dans l'étude des représentations gravées néolithiques.
Serge Cassen, Laboratoire de recherches archéologiques (LARA) - Université de Nantes, CNRS - UMR 6566 CReAAH

En voulant témoigner des gravures qu'ils apercevaient sur les rochers, les stèles et les parois des tombeaux néolithiques de l'Europe occidentale, les premiers archéologues en recherche d'une représentation tentent de restituer la morphologie des supports par le jeu de la lumière sur le relief de la pierre. Mais par une volonté compréhensible de clarifier les tracés en éliminant le détail naturel, la troisième dimension va progressivement se perdre jusqu'à atteindre, dans la seconde moitié du XX^e siècle, la stricte figuration d'un objet plan, gravure autonome, signe décontextualisé.

Notre présentation reviendra sur cette reconquête de l'objet volumique. Différentes techniques d'acquisition sont désormais mobilisées pour enregistrer le support (lasergrammétrie, lumière structurée, photogrammétrie) tandis que les gravures seront mieux détectées par compilation d'images sous éclairages obliques (ICEO), que l'illumination soit réelle ou virtuelle. Une fois les contours des enlèvements de matière inventoriés, des relations d'antéro-postériorité pourront être identifiées pour finalement suggérer une chronographie au sein de la composition. Mais la qualité de l'imagerie autorise aussi d'aborder certains aspects de la chaîne opératoire adoptée par le graveur quand les négatifs d'éclats sont encore visibles ; ici, l'indispensable expérimentation permet de retrouver des gestes, des forces, des outils, des temps de fabrication, d'autres images qu'il convient à leur tour de pleinement restituer comme objets volumiques. Enfin, la décorrélation d'image facilitera la distinction entre plusieurs désordres allant de la désagrégation minérale à la colonisation biologique, altérations qui vont influencer sur la bonne lecture des tracés.

Dans cette scène retrouvée, représentée, des signes vont passer d'un plan à l'autre du support. Par le *hors-champ* iconographique, ces mobiles dénotent alors la dimension 4 qui est le temps passé à effectuer un mouvement, un trajet...



Inventaire des tracés sur la dalle C1 de la tombe à couloir de Gavrinis, Morbihan. © Levé, décryptage et DAO S. Cassen ; modèle 3D V. Grimaud

3- Restitution : de la maquette virtuelle à l'impression 3D

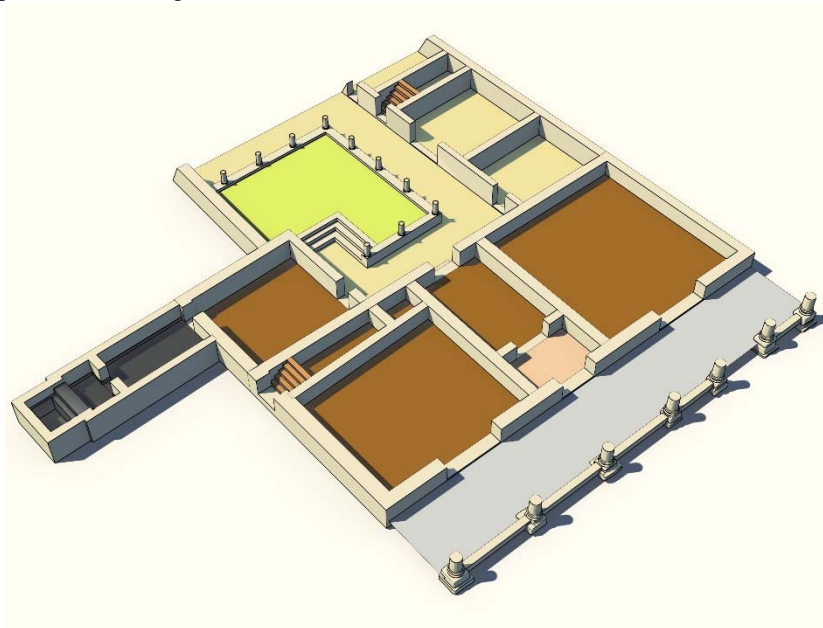
Retours d'expérience (réplique de mobilier pour expérimentations physiques, réalité virtuelle, etc.), comment travaille-t-on avec les modèles 3D, quels sont les apports scientifiques concrets ?

Le centre d'interprétation virtuel de Carhaix : des vestiges archéologiques à la réalité augmentée

Gaétan Le Cloirec, Inrap et Elodie Decarssin, Mazédia

La fouille de la réserve archéologique de Carhaix est une opération programmée qui s'est déroulée tous les étés de 2000 à 2007. Elle a permis de mettre au jour les restes d'un quartier résidentiel et commercial de *Vorgium*, ancien chef-lieu de la cité des Osismes. La mise en valeur du site était une volonté affichée par les différents intervenants dès l'élaboration du programme d'étude mais le mauvais état de conservation des vestiges a compliqué les recherches et rendu problématique la manière de valoriser l'ensemble. Comme souvent, la restitution au sol des différents espaces était la seule option envisageable pour permettre de visualiser l'organisation du quartier et des deux *domus* identifiées. Il était cependant possible d'approfondir le travail de restitutions 3d entrepris dans le cadre des analyses architecturales de la fouille. L'idée de proposer un parcours en réalité augmentée s'est donc imposée dans un projet numérique plus général puisqu'un centre d'interprétation doit abriter une dizaine de dispositifs multimédias. Pour ce faire, les travaux de modélisations ont été complétés par les archéologues afin de disposer de modèles 3d conformes sur un plan scientifique. Le texturage, l'habillage et la contextualisation de ces maquettes virtuelles ont ensuite été réalisés par une entreprise de développement numérique en étroite collaboration avec les agents de l'Inrap qui suivent le projet.

Après un bref historique du projet de fouille et de valorisation, nous verrons comment ont été utilisées les images 3d pour fournir une documentation scientifique valide à l'architecte ainsi qu'au prestataire chargé des dispositifs multimédias. Nous pourrions alors mettre en évidence les intérêts de cette collaboration pour les archéologues comme pour les prestataires chargés de la mise en valeur.



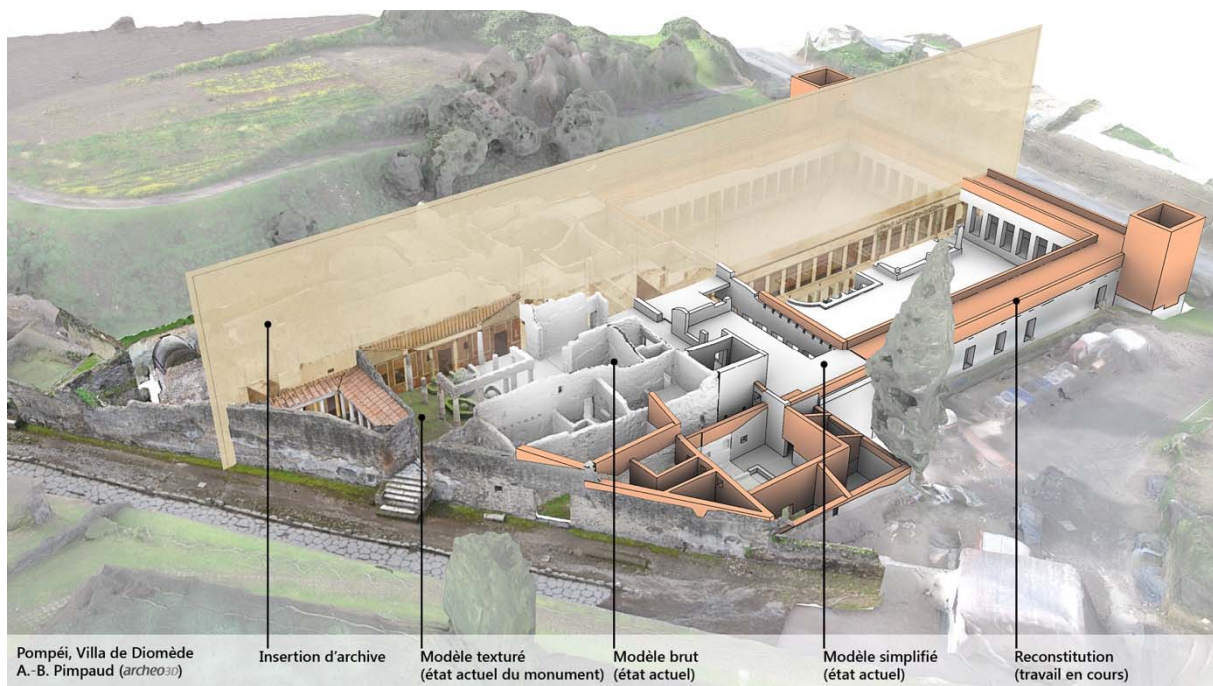
Proposition de développement en écorché du plan de la domus 5 © G. Le Cloirec, Inrap

Villa de Diomède, Pompéi : des archives anciennes aux restitutions 3D

Hélène Dessales, ENS, UMR 8546 AOrOc

La Villa de Diomède est un des premiers bâtiments découverts sur le site de Pompéi (1771-1775) et un des plus représentés et décrits par les voyageurs du Grand Tour au cours du XIX^e siècle. Engagé en 2012, un programme pluridisciplinaire a pour objectif de modéliser la fabrique de cette grande villa, des chantiers de construction successifs qui ont rythmé sa vie à l'époque romaine jusqu'à l'éruption du Vésuve en 79 ap. J.-C., aux fouilles et restaurations contemporaines qui en ont transformé l'image jusqu'à nos jours. Pour ce faire, différentes compétences se sont associées : archéologie de la construction, ingénierie des structures, gestion des archives

historiques et archéologiques par bases de données, cartographie SIG, informatique avec photogrammétrie et modélisation 3D.



Villa Diomedes Project. © Réalisation Alban-Brice Pimpaud, archeo3D

Exploration et analyse d'environnements archéologiques virtuels *Jean-Baptiste Barreau, Université de Rennes 1, UMR 6566 CReAAH*

Les possibilités de numérisation 3D de l'existant de sites et objets archéologiques aident à la compréhension de leur fonctionnement, et peuvent permettre de véritables hypothèses de reconstitutions de ceux-ci, tel qu'ils ont pu l'être à une époque donnée. L'ensemble de ces productions, que nous appelons environnement archéologique 3D, peut également concerner, en plus des architectures statiques, des simulations physiques et d'êtres vivants. Lorsque simulé par un système basé sur des techniques interactives et immersives de réalité virtuelle, cet environnement que nous qualifions à ce niveau d'environnement archéologique virtuel, permet aux archéologues de l'explorer, l'analyser et ainsi démontrer certaines hypothèses. À partir de quelques exemples, nous essaierons de proposer une réflexion autour de potentialités d'évolution du métier d'archéologue grâce à ces environnements. Nous discuterons enfin de perspectives permettant une implication optimale des archéologues dans la co-construction de cette réflexion.





Reconstitutions en réalité virtuelle immersives. © IRISA-Inria

3D pour l'archéologie : quelles interactions, pour quoi faire ? *Ronan Gagne, et Valérie Gouranton, Inria, UMR 6074 IRISA*

Les techniques de production de données 3D sont de plus en plus intégrées aux chaînes opératoires des archéologues. Toutefois, ces données restent très souvent utilisées uniquement pour la production d'images, qu'elles soient en 2D ou en 3D. Au-delà des différentes modalités de visualisation associées à ces données, quelles sont les interactions que l'on peut envisager autour de ces données et pour quels usages ?

La réalité augmentée et la réalité virtuelle permettent d'envisager des interactions naturelles et/ou complexes avec les environnements numériques en 3D : interactions physiques, tangibles, ou encore haptiques (retour d'effort), à travers différentes modalités, métaphores, associées à des procédures, ou des gestes... Ces interactions peuvent être intégrées dans une chaîne opérationnelle, en support du travail de l'archéologue dans la réalisation de ses études, ou bien s'inscrire dans une reconstitution fonctionnelle afin de reproduire des procédures ou des gestes afin d'aider à la compréhension du fonctionnement d'un objet, d'un site, ou encore d'une activité humaine.

Nous aborderons différents types d'interactions en environnement 3D à travers plusieurs études réalisées en collaboration entre l'Inrap et Inria/IRISA à Rennes qui permettront d'illustrer à la fois des interactions à vocation opérationnelle en support à des processus de fouille, et des interactions fonctionnelles avec des objets archéologiques ou dans le cadre d'activités humaines du passé.



Interactions en environnements de réalité virtuelle et de réalité mixte.
 © IRISA-Inria

Toucher l'intangible : technologies additives pour l'archéologie *Théophile Nicolas, Inrap, UMR 8215 Trajectoires*

Actuellement, la fabrication additive est popularisée par l'impression 3D grand public et le prototypage rapide. L'application de la fabrication additive aux études patrimoniales a commencé avec la démocratisation des outils d'acquisition tels que la photogrammétrie, ou les scans 3D permettant de générer simplement des modèles 3D. Ces technologies permettent de produire relativement rapidement et à moindre coût des instantiations d'objets physiques solides, le plus souvent de petites dimensions et réalisées dans un seul matériau. Elles sont le plus

fréquemment mises en œuvre pour créer des substituts 3D physiques permettant la mise à disposition des publics d'éléments tangibles (objets mobiliers et immobiliers) facilement manipulables, voir fonctionnelle.

Le développement de l'usage des technologies d'imagerie médicale dans le domaine de l'archéologie, permettant un accès non destructif à la structure interne d'artefacts combinés à l'impression 3D, offrent aujourd'hui de nouvelles perspectives telles que la visualisation, l'analyse et la manipulation physique d'objets inaccessibles et/ou fragiles. La combinaison de ces technologies d'impression avec celles de l'imagerie médicale offre la possibilité de créer des substituts 3D numériques et physiques d'objets complexes pour étudier, analyser et interpréter leur structure interne par l'analyse volumétrique, le rendu 3D et l'impression 3D.

Après un rapide tour d'horizon des technologies mobilisées et d'applicatifs dans le domaine du patrimoine (restauration, aide à la fouille, reproductions...), nous présenterons plusieurs modalités d'interactions physiques avec des objets inaccessibles intégrée dans les processus métier de l'archéologie. Nous mettrons cette méthodologie en perspective par rapport aux processus existants afin de caractériser son intérêt et les gains identifiés. Le développement de ces technologies permet aujourd'hui d'envisager une démocratisation des procédés, tout particulièrement dans le domaine de l'archéologie préventive où les perspectives ne se limitent pas uniquement à la valorisation, mais à des fins de documentations pérennes et de recherches.



Poids de balance Ossé, la Clairiserie (Ille-et-Vilaine) (J. Le Gall 2015) – exemple de reconstructions 3D à partir des données de la tomodensitométrie et impression 3D. © H. Paitier, Inrap

La fouille virtuelle, entre le scanner et l'imagerie 3D, doit-on tout révéler ?

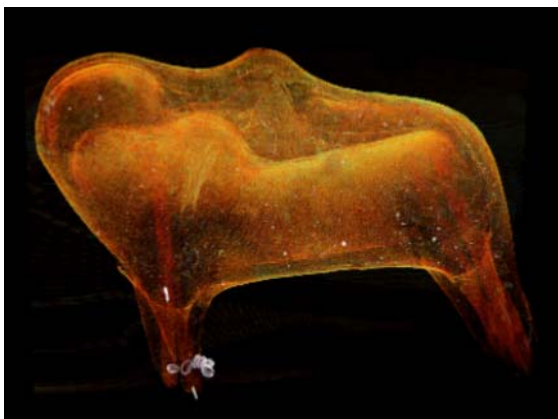
Christophe Moulherat, Musée du quai Branly - Jacques Chirac, UMR 8546 AOrOc et Nathalie Ginoux, Sorbonne Université, UMR 8167 Orient et Méditerranée

Le développement des technologies d'imagerie à des fins d'étude et de conservation des biens culturels ouvre la possibilité d'accéder à l'anatomie complète d'objets complexes et contribue à une meilleure connaissance de leur fonction parfois magique ou sacrée.

Cet examen virtuel, non intrusif et reproductible, fait évoluer les métiers des archéologues, anthropologues, historiens de l'art ou des restaurateurs et dévoile des informations insoupçonnées sur les œuvres tout en respectant leur intégrité matérielle.

Mais ce plongeon au cœur des pièces ne revient-il pas à révéler des secrets justement voués à être bien gardés ? N'est-ce pas trahir les populations qui en sont à l'origine ?

À partir d'exemples pris sur tous les continents, nous aborderons la question des limites dans l'utilisation de ces technologies.



© Ch. Moulherat, Musée du quai Branly-J.-C